

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.198-201

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЛЧМ КВ РАДАРА БИСТАТИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ НА ТРАНСЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ТРАССЕ АЛИС СПРИНГС (АВСТРАЛИЯ) – РОСТОВ-НА-ДОНУ (РОССИЯ)

В.П. Урядов¹, Г.Г. Вертоградов², М.С. Складьевский², Ф.И. Выборнов¹

¹НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

²ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Реализованы возможности позиционирования высокоширотных ионосферных неоднородностей с помощью ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора, используемого в качестве загоризонтного КВ радара бистатической конфигурации на трассе Алис Спрингс (Австралия) – Ростов-на-Дону (Россия). Показано, что наблюдаемые на трассе Алис Спрингс – Ростов-на-Дону аномальные сигналы, приходящие с азимутов $\sim 10\text{--}25^\circ$ с задержками, превышающими на 10-16 мс задержку прямого сигнала, обусловлены рассеянием радиоволн на неоднородностях F -слоя высокоширотной ионосферы, локализованных в вечернем секторе аврорального овала на широтах $\sim 70\text{--}80^\circ\text{N}$.

Введение

Для локализации рассеивающих неоднородностей в высокоширотной ионосфере используются дальнедействующие однопозиционные и двухпозиционные КВ радары. К однопозиционным системам относится сеть радаров SuperDARN с дальностью действия несколько тысяч км [Greenwald et al., 1995]. Разнесение приемных и передающих пунктов существенно расширяет возможности радарных исследований ионосферных неоднородностей различных широт, используя уже существующие средства зондирования. К таким системам относится система сверхдальнего загоризонтного широкополосного ЛЧМ-зондирования бистатической конфигурации, которая впервые использовалась на трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону [Вертоградов и др., 2010].

В докладе представлены результаты использования ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора применительно к позиционированию мелкомасштабных неоднородностей высокоширотной ионосферы, ответственных за аномальные (рассеянные) сигналы, зарегистрированные на трансэкваториальной трассе Алис Спрингс (Австралия) – Ростов-на-Дону (Россия).

Результаты наблюдений и моделирования

Наблюдения проводились в марте 2014 г. ЛЧМ передатчик в Алис Спрингс ($22,97^\circ\text{S}$, $134,43^\circ\text{E}$) работал в диапазоне частот 5–30 МГц, скорость перестройки частоты составляла 125 кГц/с, зондирование осуществлялось каждые 4 минуты. Прием ЛЧМ сигналов осуществлялся в Ростове-на-Дону с помощью ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора [Вертоградов и др., 2010], временная синхронизация приемной аппаратуры с мировым временем обеспечивалась с помощью сигналов GPS. По данным (www.noaa.gov) в период наблюдений была спокойная геомагнитная обстановка, магнитный индекс $K_p = 1\text{--}2$. Во время наблюдений на ионограммах наклонного зондирования, кроме прямых сигналов различной кратности, регистрировались аномальные сигналы с различной задержкой относительно прямого сигнала. Примеры ионограмм с аномальными сигналами показаны на рис. 1-3. Маркерами PC1 и PC2 (рассеянный сигнал) мы выделили аномальные диффузные сигналы с большими абсолютными задержками $\sim 52\text{--}58$ мс (10-16 мс относительно задержки прямого сигнала), приходящие с азимутов $\sim 10\text{--}25^\circ$, анализу которых будет уделено в дальнейшем основное внимание. Азимут угла прихода прямого сигнала, распространяющегося по дуге большого круга между приемником и передатчиком, составляет 107° , длина трассы составляет 12170 км.

Из рис. 1-2 видна эволюция рассеянных сигналов PC1 и PC2 с течением времени. Вначале сигнал PC1 наблюдался в диапазоне частот $\sim 17,7\text{--}24,6$ МГц в виде диффузного трека в интервале групповых задержек $\Delta t_{\text{гр}} \sim 57,4\text{--}59,1$ мс в сравнительно узком секторе азимутальных углов прихода $\Delta\alpha \approx 12\text{--}13^\circ$ (см. рис. 1). В дальнейшем аномальный сигнал наблюдался в виде 2-ух отдельных треков: на низких частотах $\sim 10\text{--}14$ МГц с задержкой $\Delta t_{\text{гр}} \sim 55\text{--}56$ мс и азимутами $\Delta\alpha \sim 10\text{--}20^\circ$ (PC2) и на частотах $\sim 18\text{--}25$ МГц с задержкой $\Delta t_{\text{гр}} \sim 57\text{--}58$ мс и азимутами $\Delta\alpha \sim 13\text{--}15^\circ$ (PC1) (см. рис. 2). После 13:00 UT имело место слияние аномальных сигналов PC1

и PC2. В этот период времени нижняя граница группового запаздывания AC уменьшилась до значений $\Delta t_p \sim 51$ мс. В это время заметно увеличилась диффузность треков до $\sim 2-3$ мс и расширился сектор азимутальных углов прихода AC до значений $\Delta\alpha \sim 14-26^\circ$, причем особенно заметно для более низких частот $\sim 10-15$ МГц (см. рис. 3).

Полагая, что сигналы PC1 и PC2 обусловлены рассеянием радиоволн на ионосферных неоднородностях, для их позиционирования мы провели моделирование распространения и ракурсного рассеяния радиоволн с учетом измерений дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) и угловых-частотных характеристик (УЧХ) по методике, изложенной в [Урядов и др., 2008], используя модель ионосферы IRI-2012.

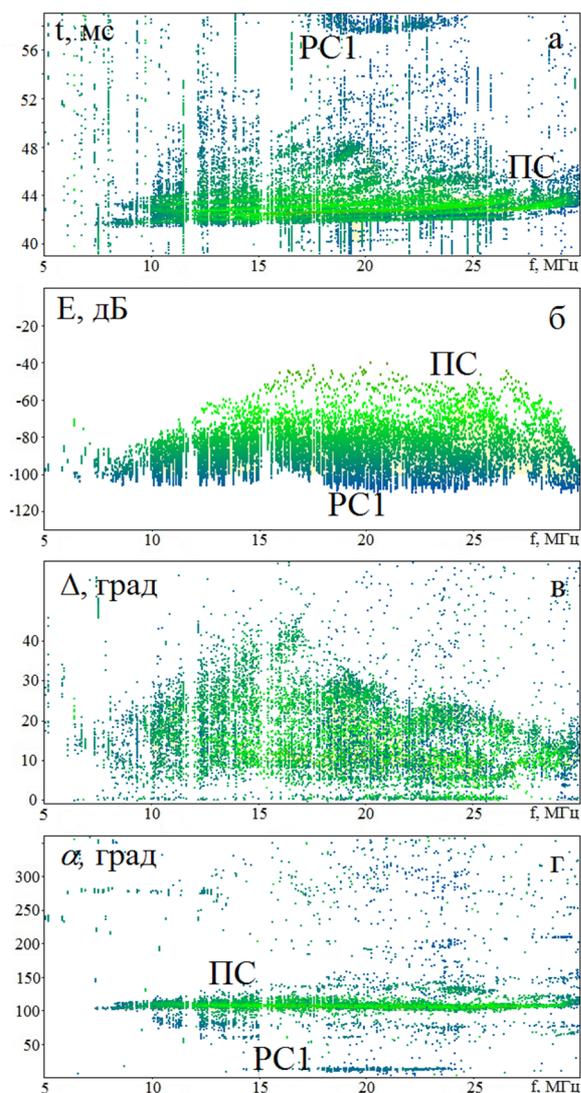


Рисунок 1. Многопараметрическая ионограмма на трассе Алис Спрингс – Ростов-на-Дону. 11:37UT 06.03.2014 г. ДЧХ – (а), АЧХ – амплитудно-частотная характеристика (б), УЧХ – угол места (в), азимутально-частотная характеристика (г). PC – прямой сигнал, PC1 – рассеянный сигнал.

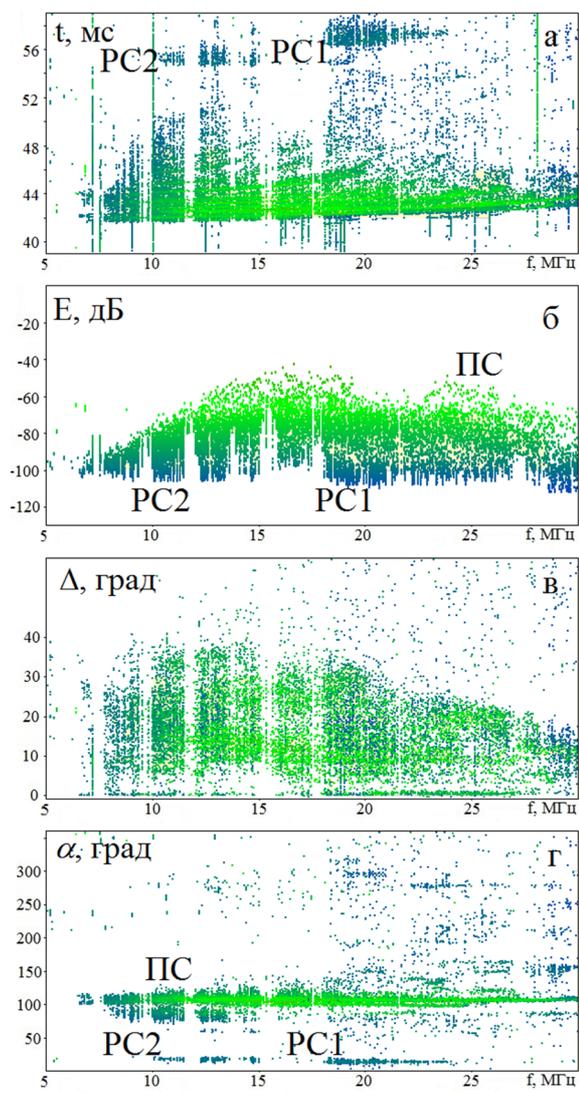


Рисунок 2. Многопараметрическая ионограмма на трассе Алис Спрингс – Ростов-на-Дону. 12:10UT 06.03.2014 г. ДЧХ – (а), АЧХ – (б), УЧХ – (в), азимутально-частотная характеристика (г). PC – прямой сигнал, PC1 и PC2 – рассеянные сигналы.

На сверхдальних трансэкваториальных радиоперелиниях Алис Спрингс (Австралия) – Ростов-на-Дону (длина 12170 км) и Алис Спрингс – область рассеяния (длина 11370÷11620 км) трассы пересекают различные особенности экваториальной и высокоширотной ионосферы, включая экваториальную аномалию и главный ионосферный провал. Схема эксперимента показана на рис. 4.

В расчетах рассеянных сигналов область ионосферы с рассеивающими мелкомасштабными неоднородностями задавалась в виде диска радиусом 50 км на высотах F области от 200 км до высоты максимума F -слоя ($\sim 325-345$ км для различного положения рассеивающих центров). Положение диска с

неоднородностями варьировалось в пределах азимутального сектора приема рассеянных сигналов до совпадения расчетной и экспериментальной ионограмм по диапазону задержек рассеянных сигналов.

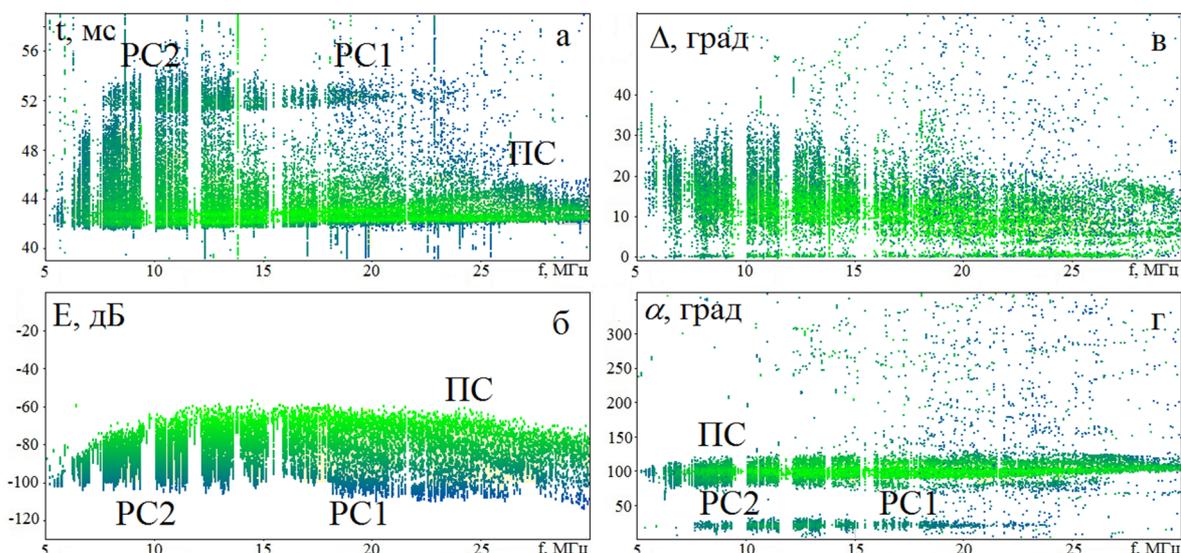


Рисунок 3. Многопараметрическая ионограмма на трассе Алис Спрингс – Ростов-на-Дону. 13:33UT 06.03.2014 г. ДЧХ – (а), АЧХ – (б), УЧХ – (в), азимутально-частотная характеристика – (г). ПС – прямой сигнал, PC1 и PC2 – рассеянные сигналы.



Рисунок 4. Трассы прямого (1) и рассеянного (2-3) сигналов для положения области рассеяния в 12:33UT 06.03.2014 г. 1 – Алис Спрингс – Ростов-на-Дону, 2 – Алис Спрингс – область рассеяния, 3 – область рассеяния – Ростов-на-Дону.

Согласно расчетам, наилучшие условия ракурсного рассеяния имеют место для расположения ионосферных неоднородностей на высотах $\sim 290 \div 310$ км.

Расчеты показывают, что для массива экспериментальных ДЧХ и УЧХ рассеянных сигналов PC1 и PC2 выполняются ракурсные условия рассеяния на мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях в F области высокоширотной ионосферы. Результаты позиционирования рассеивающих неоднородностей нанесены на физическую карту в виде точек для сигнала PC1 и треугольников для сигнала PC2 (см. рис. 5). Около рассеивающих центров указано время UT. Зелеными линиями показан интервал азимутальных углов приема рассеянных сигналов PC1 и PC2 ($10^\circ \div 25^\circ$). Положение аврорального овала по данным спутника DMSP для 12:30 UT 06.03.2014 г. показано темным фоном. Как видно из рис. 5 во время наблюдений неоднородности, ответственные за аномальные (рассеянные) сигналы, позиционируются в вечерней F -области ионосферы (~ 19 -21 часов местного времени), занимая интервал широт $\sim 70^\circ \div 80^\circ N$ и долгот $\sim 70^\circ \div 140^\circ E$. Для данного периода наблюдений такое положение неоднородностей близко соответствует положению южной границы аврорального овала, характеризуемого развитой ионосферной

турбулентностью [Tsunoda, 1988]. Это видно из сопоставления положения рассеивающих областей отмеченных на рис. 5 овалом (II) с положением аврорального овала для 12:30UT 06.03.2014 г. по данным спутника DMSP (<http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/spectrogram/index.html>) (см. рис. 5).

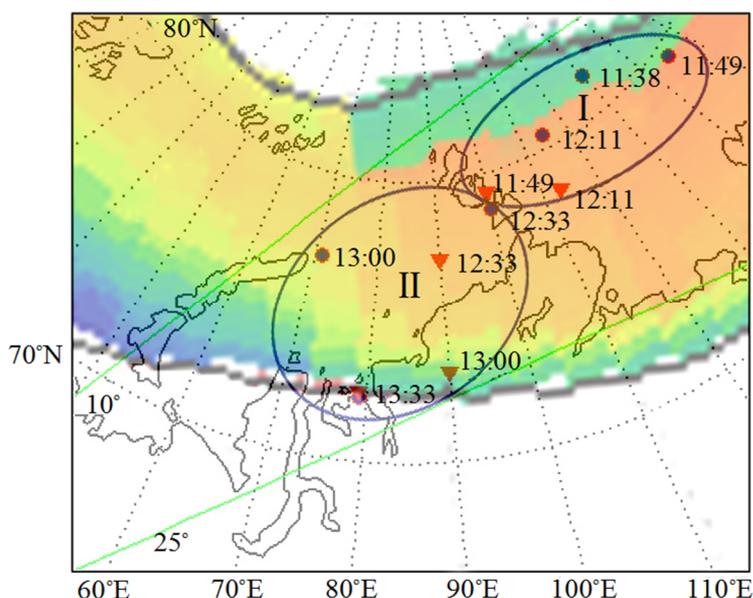


Рисунок 5. Месторасположение областей (I и II) с ионосферными неоднородностями, ответственными за сигналы PC1(•) и PC2 (▼) на трассе Алис Спрингс – Ростов-на-Дону, в проекции на поверхность Земли.

Выводы

В статье представлены результаты исследований особенностей ионосферного распространения радиоволн на трассе Алис Спрингс (Австралия) – Ростов-на-Дону с помощью нового инструмента – ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора. Показано, что использование этого инструмента, способного измерять ключевые характеристики ионосферного канала (ДЧХ, АЧХ и УЧХ) всех мод распространения позволяет определять месторасположение рассеивающих ионосферных неоднородностей, ответственных за аномальные сигналы на трассах наклонного зондирования.

Установлено, что наблюдаемые на трассе Алис Спрингс (Австралия) – Ростов-на-Дону аномальные сигналы, приходящие с азимутов $\sim 10\text{--}25^\circ$ с задержками, превышающими на 10-16 мс задержку прямого сигнала, обусловлены рассеянием радиоволн на неоднородностях F -слоя высокоширотной ионосферы, локализованных в вечернем секторе аврорального овала на широтах $\sim 70\text{--}80^\circ\text{N}$.

Благодарности. Авторы благодарят сервисную службу Space Weather Prediction Center (USA) за возможность получения данных спутника DMSP по авроральному овалу. Работа В.П. Урядова и Ф.И. Выборнова выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

Список литературы

- Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R. et al. DARN/SuperDARN: A Global View of the Dynamics of High-Latitude Convection // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 761–796.
- Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г., Понятов А.А. Сверхдальнее зондирование ионосферного канала с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала // Изв. Вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 176-187.
- Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Понятов А.А. и др. О структуре и динамике области ионосферы с искусственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов // Изв. Вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, №12. С. 1011-1025.
- Tsunoda R.T. High-latitude F region irregularities: A review and synthesis // Rev. Geophys. 1988. V. 26, no. 4. P.719-760.